特高压直流六分裂跳线线长计算方法

段福平[1]，柳达[1]，吕铎[2]，肖峰[3]，吴昊亭[3]，王京京[1]
（1. 浙江省送变电工程有限公司，杭州市 310016；2. 国家电网有限公司，北京市 100032；
3. 国家电网有限公司特高压建设分公司，北京市 100052）

摘　要：【目的】为提高特高压直流六分裂跳线线长的计算精度，高效实现跳线的装配式安装，提出了一种耐张串末端倾斜角和跳线长度的精确计算方法。【方法】以导线水平张力为基准逐个分析各连接元件倾斜角，通过循环迭代方法计算耐张串的末端倾斜角；建立基于三维坐标系的通用计算模型，以软跳线子导线平弧垂一致为条件，利用悬链线公式计算跳线长度；采用有限元模拟、AutoCAD 三维建模和现场实测方法验证耐张串末端倾斜角计算方法、通用计算模型和跳线长度计算方法的准确性。【结果】所提循环迭代方法经过 4 次迭代后末端倾斜角已稳定，倾斜角的计算结果与有限元模拟值吻合；所提通用计算模型获得的各跳线悬挂安装点位置与 AutoCAD 绘图模拟位置一致；某实际跳线装配式安装后，经全站仪与无人机测量结果复核，现场实测值与计算值吻合；某跳线案例表明装配式安装相比高空模拟法，高空作业量减少 46.4%，工效提高 25%，人工节约 33.3%。【结论】所提耐张串倾斜角迭代计算方法比传统的将耐张串等效为均布自重荷载方法更准确；编写的六分裂跳线长度计算通用程序，图形交互性好，具有较强的实用性与便捷性；实现了特高压直流六分裂大截面导线跳线的装配式安装，达到了减少高空作业量、提升施工效率、降低导线损耗和保障施工工艺质量的目的。

关键词：输电线路；特高压直流；六分裂跳线；理论计算；有限元分析；装配式安装
中图分类号： TM751　　**文献标志码：** A　　**文章编号：**1000-7229(2026)10-0195-12
DOI：10.12204/j.issn.1000-7229.2026.10.015

Calculation and Analysis on Jumper Length of the Six-Bundle Jumpers in UHVDC

DUAN Fuping[1], LIU Da[1], LÜ Duo[2], XIAO Feng[3], WU Haoting[3], WANG Jingjing[1]
(1. Zhejiang Electric Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310016, China;
2. State Grid Corporation of China, Beijing 100032, China;
3. State Grid Corporation of China Ultra High Voltage Construction Branch, Beijing 100052, China)

ABSTRACT: [**Objective**] To improve the calculation accuracy of the jumper length for six-bundle jumpers in ultra-high voltage direct current (UHVDC) transmission lines and to efficiently achieve prefabricated installation of the jumpers, a precise calculation method for the inclination angle at the end of the tension string and the jumper length is proposed. [**Methods**] Taking the horizontal tension of the conductor as the reference, the inclination angles of individual connecting components are analyzed sequentially, and the inclination angle at the end of the tension string is calculated using an iterative method. A general calculation model based on a three-dimensional coordinate system is established, and the jumper length is calculated using the catenary formula under the condition that the sag of each sub-conductor of the flexible jumper is uniform. The accuracy of the inclination angle at the end of the tension string, the general calculation model, and the jumper length calculation method is verified using finite element simulation, three-dimensional modeling in AutoCAD, and field measurements. [**Results**] The proposed iterative method achieves a stable terminal inclination angle after four iterations, and the calculated inclination angles are in good agreement with the finite element simulation results. The suspension points of each jumper obtained using the proposed general calculation model are consistent with the simulated positions generated by AutoCAD modeling. After the prefabricated installation of an actual jumper, field measurements obtained via total station and drone surveys closely matched the calculated values. A jumper installation case demonstrates that, compared with the traditional high-altitude simulation method, the prefabricated approach reduces high-altitude workload by 46.4%, increases

基金项目：国家电网有限公司科技项目(SGZB0000TGJS2500090)

© Editorial Department of Electric Power Construction. OA under CC BY-NC-ND 4.0.

work efficiency by 25%, and reduces labor costs by 33.3%. [**Conclusions**] The proposed iterative method for calculating the inclination angle of the tension string is more accurate than the traditional method that simplifies the tension string as a uniformly distributed self-weight load. The general-purpose program developed for calculating the length of six-bundle jumpers features good graphical user interaction and offers strong practicality and convenience. The prefabricated installation of six-bundle large-cross-section conductor jumpers for UHVDC transmission lines has been successfully realized, achieving the objectives of reducing high-altitude workload, improving construction efficiency, minimizing conductor loss, and ensuring high quality of construction technology.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGZB0000TGJS2500090).

KEYWORDS: transmission line; ultra-high voltage direct current; six-bundle jumper; theoretical calculation; finite element analysis; prefabricated installation

0 引 言

发展特高压输电,自纳入国民经济和社会发展第十一个和第十二个五年规划纲要以来,已成为国家能源发展战略的重要组成部分[1-2]。“十三五”“十四五”规划,提出了加强跨区域骨干能源输送网络建设,推进能源革命,建设清洁低碳、安全高效的能源体系要求[3-4]。国家发展改革委、国家能源局,明确了构建新型电力系统行动方案,建设“沙戈荒”大基地和主要流域水风光一体化基地送出通道[5]。特高压直流输电具有点对点直达、超大输送容量、长距离输电、低损耗等优势[6],截至2025年底,国家电网有限公司已累计建成42项特高压工程(22交20直),跨区跨省输电能力达3.7亿kW,显著提升了我国能源供应的韧性与可靠性[7]。

±800 kV特高压直流输电线路导线设计普遍采用大截面[8-9]、六分裂结构,耐张塔金具串为多联型式,耐张跳线采用笼式刚性结构[10-12],具有跳线安装长度长、耐张串自重大、跳线组装结构相对复杂、施工安装作业量大的特点。输电线路耐张塔跳线安装通常采用高空模拟法[13-18],即在高空进行跳线金具串的预安装,再利用跳线本身进行高空比拟、弧垂观测,然后画印做好标记将跳线下放至地面或在高空开断后压接引流线夹,最后完成安装。传统高空模拟法存在高空作业量大、安装效率低、导线损耗高及工艺美观性不足等问题。基于减小高空作业量、通过计算实现装配式安装的目的,国内开展了相关技术研究,文献[19]根据空间位置计算耐张塔两端耐张线夹的净空距离,并利用设计单位给出的跳线弛度,计算跳线线长;文献[20]根据设计单位提供的参数及其空间位置关系,赋予每根跳线挂点、跳线线夹三维坐标值,利用斜抛物线线长公式[21-22]计算跳线长度;文献[23]从直流耐张塔的结构入手,融入空间三维坐标系,建立跳线长度计算模型,确定各项坐标值,最后提出跳线长度的计算方法;文献[24]针对±800 kV直流输电线路工程导线耐张串串长较长、串重较大,对连续档内的导线弧垂、张力有影响,利用力矩平衡原理,对连续档内导线耐张串荷载与导线弧垂、张力之间的关系进行计算和分析;文献[25]分析了耐张串重力对特高压导线弧垂和张力的影响,采用现场实测和理论分析方法进行了研究验证;文献[26]采用精确计算法、悬链线计算法和直棒计算法3种模型,研究了直流特高压线路耐张串对导线弧垂的影响;文献[27]提出将绝缘子串等效为悬链线,分析计算了其对孤立档导线应力、弧垂的影响;文献[28]推导了小耐张段导线弧垂的计算方法,得出了串重、串长、导线张力变化对导线弧垂影响明显的结论;文献[29]分析计算了特高压工程耐张串对小耐张段导线弧垂及应力的影响,结果显示,耐张塔所在档距越小,耐张串引起的张力差越大;文献[30]提出了特高压耐张绝缘子串的悬链线弧垂计算方法,用于校验对地距离和铁塔电气间隙,精确计算了耐张串绝缘子需要倒挂的片数。

现有跳线长度计算方法主要包括传统几何解析法[19-22]、三维坐标解析法[20]、新型改进计算方法[23],对耐张串末端耐张线夹位置的倾斜角,多采用静态、二维、理想化倾斜角假设,未实现倾斜角与导线受力的耦合求解;同时以往研究将耐张串视为直棒按串重处于串中方式进行计算,忽略耐张串多个不同单位长度重量结构元件对空间姿态的影响,导致耐张串末端耐张线夹位置与实际工况存在偏差,影响跳线长度的计算精度;以上研究虽已结合三维坐标系提出了理论计算方法[19-23],但对耐张串末端耐张线夹位置的倾斜角,未详细阐述其计算方法,或将耐张串视为直棒按简单的串重除以串长方式进行计算,未充分考虑特高压直流线路超长超重耐张串由多个不同结构长度、不同重量连接元件组成的影响,倾斜角计算不够精确;同时,以往研究更多关注耐张串对导线

弧垂及应力的影响，未充分考虑装配式跳线的计算需求，同时也缺乏现场实测验证。

基于以上背景，本文首先以导线水平张力为基准逐个分析连接元件倾斜角从而精确计算超长超重耐张串的末端倾斜角，其次构建三维坐标系，建立通用计算模型，然后采用悬链线方法精确计算跳线长度，最后开展现场应用实测，验证计算数值准确性，实现特高压直流六分裂大截面导线跳线的装配式安装。

1　特高压直流六分裂跳线基本结构

±800 kV 特高压直流六分裂跳线搭设于耐张塔大小号侧耐张串上的耐张线夹之间，用于连通耐张塔前后导线，中间一般安装有双 V 型笼式刚性跳线串，笼式刚性跳线串起支撑稳定作用，笼式刚性区段跳线搭设呈平直状态，笼式刚性跳线两侧与耐张线夹连接区段跳线有一定的弧垂，呈悬链线状态。跳线规格一般与导线相同，采用 900、1000、1250 mm^2 截面的钢芯铝绞线[1-2]。

1.1　耐张串基本结构

根据导线规格、使用气象、海拔、地形等条件，特高压直流耐张串分不同结构串型。常用的包括三联、四联等型式，串末导线端采用正六边形布置，六分裂导线均匀布置在直径 1.0 m[9] 的圆周上。±800 kV 特高压直流输电线路大截面导线的典型耐张串及导线布置如图 1 所示。

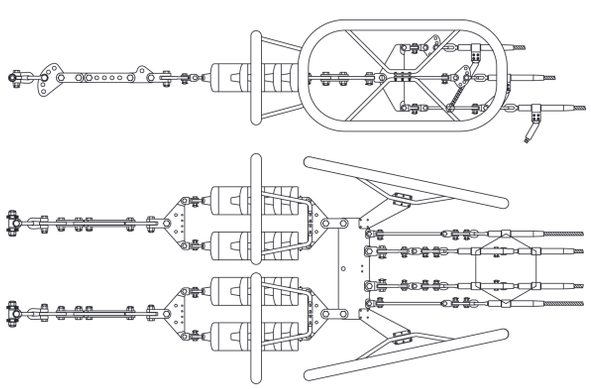


图 1　±800 kV 特高压直流典型导线耐张串示意图

Fig. 1　Schematic diagram of tensile series of typical conductor for ±800 kV UHVDC

1.2　跳线基本结构

±800 kV 特高压直流输电线路耐张塔普遍采用笼式刚性跳线方案[10]，其总体安装如图 2 所示。笼式刚性跳线配双联 V 型跳线串，笼式区段六分裂导线采用正六边形布置在直径 0.9 m 的圆周上，如图 3 所示。设计的跳线安装图中，一般会给出大小号两侧的档中弧垂及平弧垂推荐值。

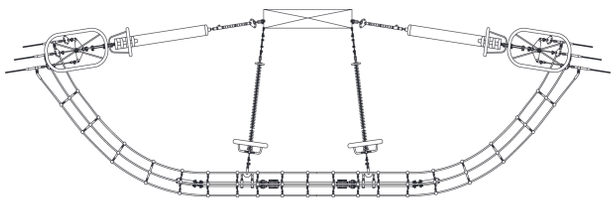


图 2　±800 kV 特高压直流六分裂跳线总体安装示意图

Fig. 2　Overall installation schematic diagram of ±800 kV UHVDC six-bundle jumper

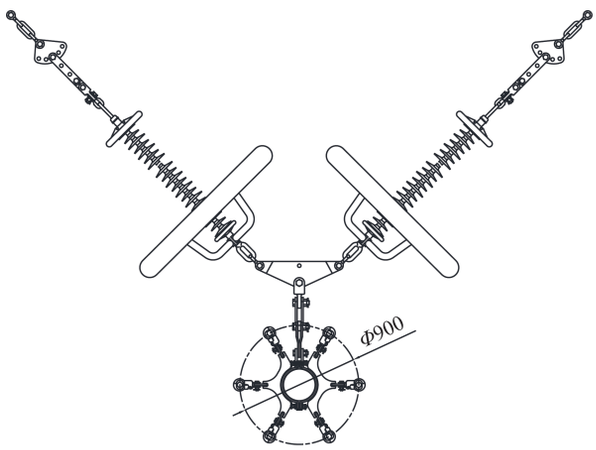


图 3　笼式刚性跳线 V 串连接示意图

Fig. 3　Diagram of V-series connection of cage rigid jumpers

2　计算模型构建

2.1　模型构建原则

耐张塔装配式跳线精确计算数学模型的构建遵循准确性、全面性、实用性及通用性原则。模型能准确反映跳线安装状态的几何形态，全面考虑影响跳线长度计算的各类因素，具备简洁清晰的计算逻辑与易于操作的计算流程，能够适应各种塔型、耐张串型、跳线规格。

2.2　关键影响因素分析

1）机械荷载因素：包括耐张串倾斜角（由耐张串重量、长度、导线张力、导线比载、档距、高差等决定）、跳线弧垂（由导线型号、比载、张力、跳线档距、高差等决定）。

2）结构参数因素：涵盖耐张塔的塔头尺寸、笼式刚性跳线支架的安装位置与高度、耐张串的长度与类型、线路转角、耐张串上的导线布置及分裂间距、笼式刚性跳线上的导线布置及分裂间距等。

2.3　数学模型框架

基于上述原则与影响因素分析，构建耐张塔装配式跳线精确计算数学模型的框架如下：

1）三维坐标建立：采用空间直角坐标系法，以耐张塔塔头大小号侧耐张串挂点连线中心为坐标原

点，建立三维坐标系，用于分析跳线各安装点的几何位置。

2）耐张串倾斜角计算：结合耐张塔大小号两侧的档距、高差、导线张力、导线比载及耐张串本身的重量、长度，进行耐张串倾斜角的分析计算。

3）耐张串末端跳线安装点坐标计算：根据耐张串长度及计算得到的倾斜角，结合线路水平转角，进行耐张串末端跳线安装连接点的坐标分析计算。

4）笼式刚性跳线安装点坐标计算：根据耐张塔横担及笼式刚性跳线串结构、布置形式，分析计算笼式刚性跳线安装固定点的坐标。

5）跳线弧垂、线长计算：根据确定的大小号侧耐张串末端跳线安装点、笼式刚性跳线安装固定点坐标，分别计算大小号档的跳线档距、高差，结合设计图推荐的平弧垂或档中弧垂，分别计算各子导线的弧垂，进而计算出大小号侧跳线档内的线长。

6）跳线总长确定：按小号档跳线长+笼式刚性直通段长度+大号档跳线长算出各分裂导线的跳线总长。

3 耐张串倾斜角计算

3.1 传统计算方法

传统的耐张串末端倾斜角计算[20,23]都是依据李博之提出的计算公式进行的[21]，如式（1）所示。

$$\varphi = \arctan\left(\frac{l\omega}{2H\cos\delta} + \left(\lambda - \frac{\lambda^2\cos\delta}{2l}\right)\frac{\omega_0 - \omega}{H} \pm \frac{h}{l} - \frac{\omega_0}{H\cos\delta}\lambda\right) \tag{1}$$

式中：φ为耐张串倾斜角；l为档距；ω为导线自重比载；H为导线水平张力；δ为导线悬挂点高差角；λ为耐张串长度；ω_0为耐张串自重比载；h为导线悬挂点高差。

该计算方法将耐张串等效成自重荷载均匀分布的串，但特高压直流线路的耐张串自重大，长度长，经过理论计算及现场实际测量对比，发现计算结果与实际有较大偏差。以甘肃—浙江±800 kV特高压直流工程N5436大号侧左极为例，档距为362 m，导线悬挂点高差为11.972 m，耐张串长为23.633 m，六分裂导线自重比载为39.337 N/m，温度13 ℃时的导线水平张力为75 602 N，单极耐张串自重为73 635 N，根据式（1）计算得出的耐张串末端倾斜角为6.280 °，换算成串末端与串挂点间高差为2.585 m，但实际现场测量串末端与串挂点间高差为4.442 m，偏差较大，该计算方法难以满足精确计算需求，需进一步改进。

3.2 精确计算方法

结合特高压直流线路耐张串超长超重的特点，参考文献[25]、文献[30]提出的耐张串对导线弧垂、张力影响的分析方法，提出精确计算法。将耐张串解析为各金具零件和绝缘子铰接组成的连接件进行受力分析，如图4所示。图4中A为耐张串铁塔挂点，B为耐张线夹，T_A为挂点处轴向力，T_B为耐张线夹处轴向力，G_d为耐张塔所承担的导线垂直荷载，G_i（i=1，2，3，···，I）为由耐张塔挂点起各连接金具或绝缘子的自重，λ_i为由耐张塔挂点起各连接金具或绝缘子的结构长度，φ_i为由耐张塔挂点起各连接金具或绝缘子的倾斜角，$\sum\lambda_{ih}$为耐张串水平投影总长度，$\sum\lambda_{iv}$为耐张串垂直投影总长度。

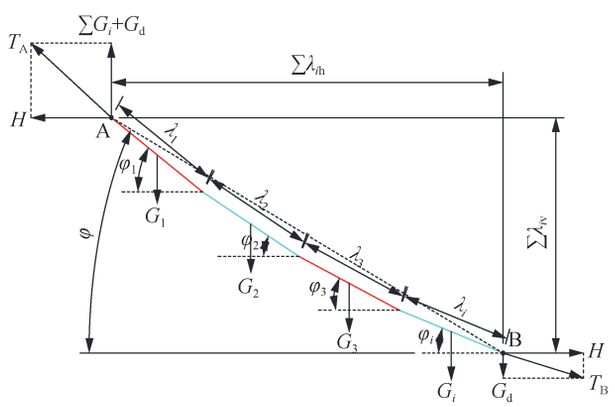


图4 耐张串总体倾斜角分析示意图

Fig. 4 Analysis diagram of the overall inclination angle of tension string

以第1个连接金具为例，进行倾斜角计算，受力分析如图5所示。

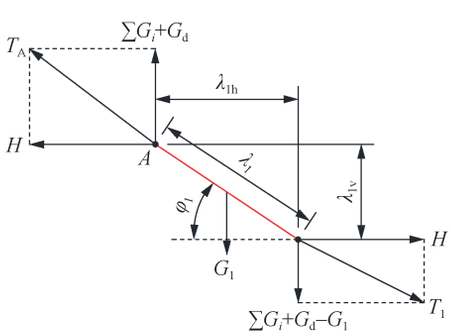


图5 耐张串第1个连接件倾斜角分析示意图

Fig. 5 Analysis diagram of the first connecting piece inclination angle of tension string

其端点力矩平衡方程为：

$$\left(\sum_i G_i + G_d - G_1\right)\lambda_{1h} + \frac{1}{2}G_1\lambda_{1h} - H\lambda_{1v} = \left(\sum_i G_i + G_d - G_1\right)\lambda_1\cos\varphi_1 + \frac{1}{2}G_1\lambda_1\cos\varphi_1 - H\lambda_1\sin\varphi_1 = 0 \tag{2}$$

代入倾斜角、结构长度，换算后得出第一个连接件的倾斜角为：

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{\sum_i G_i + G_{\mathrm{d}} - \frac{1}{2}G_1}{H}\right) \tag{3}$$

同理推算出第i个连接件的倾斜角为：

$$\varphi_i = \arctan\left(\frac{\sum_i G_i + G_{\mathrm{d}} - \sum_{i-1} G_i - \frac{1}{2}G_i}{H}\right) \tag{4}$$

计算至最末端连接件的倾斜角后，得到耐张串水平及垂直投影总长度，则耐张线夹处相对于铁塔挂点的倾斜角为：

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\sum_i \lambda_{iv}}{\sum_i \lambda_{ih}}\right) \tag{5}$$

以上计算中，导线水平张力、耐张串长、耐张串自重均为定量，但耐张塔所承担的导线垂直荷载需根据档内除去耐张串长度后实际净导线段的档距、高差进行计算确定，其计算值与耐张串末端水平、垂直投影长度变化直接相关，为准确获取计算值，需结合原始档距、悬挂点高差，通过循环迭代净导线段的档距、高差，经多次计算后获得。

计算除去耐张串长度后实际净导线段的档距及高差公式为：

$$l_{\mathrm{d}} = l - \sum_i \lambda_{ih} \tag{6}$$

$$h_{\mathrm{d}} = h - \sum_i \lambda_{iv} \tag{7}$$

式中：l_{d}为除去耐张串长度后实际净导线段的档距，即耐张串末端耐张线夹与邻塔挂点的水平距离；h_{d}为除去耐张串长度后实际净导线段的高差，即耐张串末端耐张线夹与邻塔挂点的高差。

耐张塔所承担的导线垂直档距及垂直荷载计算公式为：

$$l_{\mathrm{v}} = \frac{l_{\mathrm{d}}}{2\cos\left(\arctan\frac{h_{\mathrm{d}}}{l_{\mathrm{d}}}\right)} + \frac{h_{\mathrm{d}}H}{l_{\mathrm{d}}\omega} \tag{8}$$

$$G_{\mathrm{d}} = l_{\mathrm{v}}\omega \tag{9}$$

式中：l_{v}为耐张塔所承担的导线垂直档距。

先按耐张串倾斜角为0，取$\sum\lambda_{ih}=\lambda$、$\sum\lambda_{iv}=0$，按式(6)、(7)计算得出l_{d}、h_{d}，按式(8)、(9)计算得出l_{v}、G_{d}，按式(2)—(5)分别计算得出各连接元件的倾斜角、耐张线夹的倾斜角及$\sum\lambda_{ih}$、$\sum\lambda_{iv}$，按式(6)、(7)计算得出l_{dk}、h_{dk}，得到$\Delta l_{\mathrm{d}}=l_{\mathrm{d}}-l_{dk}$、$\Delta h_{\mathrm{d}}=h_{\mathrm{d}}-h_{dk}$即为偏差值，$l_{dk}$、$h_{dk}$为第$k$次迭代得到的$l_{\mathrm{d}}$、$h_{\mathrm{d}}$；再取第一次计算得到的$\sum\lambda_{ih}$、$\sum\lambda_{iv}$值按式(6)、(7)进行迭代计算，按式(8)、(9)计算l_{v}、G_{d}，按式(2)—(5)计算各连接元件的倾斜角、耐张线夹的倾斜角及$\sum\lambda_{ih}$、$\sum\lambda_{iv}$；一般经过4～6次的迭代计算，Δl_{d}、Δh_{d}的值可小于1×10^{-4} m，即误差小于1 mm，满足计算精度要求。迭代计算流程如图6所示。

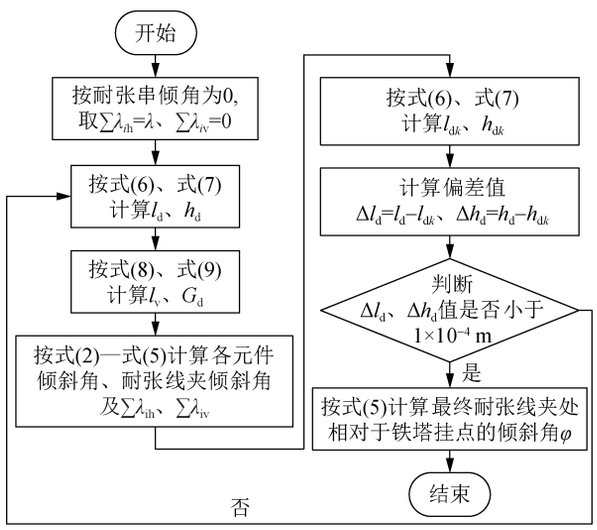


图6　耐张线夹倾斜角迭代计算流程图

Fig. 6　Flowchart for iterative calculation of tension clamp inclination angle

以N5436耐张塔大号侧为例，进行迭代计算，档距为362 m，高差为11.972 m，导线自重比载为39.337 N/m，导线水平张力为75 602 N，耐张串长度为23.633 m，单极耐张串自重为73 635 N，由138个连接件前后串接组成（单个连接件的自重及结构长度从略）。按以上步骤进行迭代计算，至第4次，Δl_{d}、Δh_{d}的值已小于1 mm，如表1所示。

表1　净导线段的档距、高差迭代计算结果

Table 1　Results of iterative calculation of span and height difference of net line segment

k	预录入数值/m		计算得出数值/m		预录入与计算数值差/mm	
	l_{dk}	h_{dk}	l_{dk}	h_{dk}	Δl_{d}	Δh_{d}
0	338.637	0	338.719	8.044	−82.115	−8 043.906
1	338.719	8.044	338.815	7.509	−96.121	534.413
2	338.815	7.509	338.809	7.544	6.660	−34.881
3	338.809	7.544	338.809	7.542	−0.433	2.275
4	338.809	7.542	338.809	7.542	0.028	−0.148
5	338.809	7.542	338.809	7.542	−0.002	0.010
6	338.809	7.542	338.809	7.542	0	−0.001

3.3　有限元分析和验证

通过理论精确分析计算，获取了相对准确的耐张串末端倾斜角，为确认计算准确性，结合有限元软

件进行分析验证。使用有限元软件ANSYS进行计算，导线采用LINK10单元模拟，绝缘子采用LINK8单元模拟，以大号侧为例建立含耐张串的有限元模型，如图7所示。

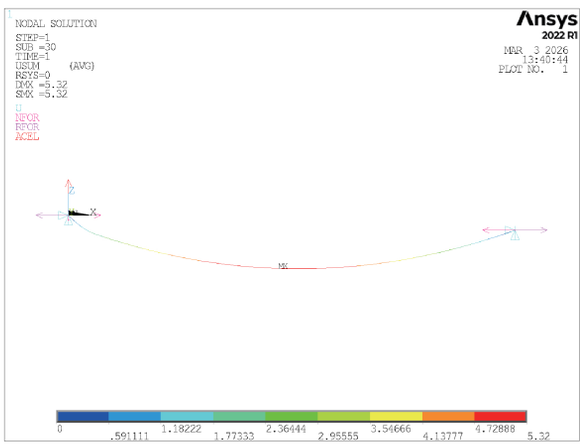


图7 档间含耐张串导线的有限元模型

Fig. 7 A finite element model of the conductor with tension insulator strings between towers

耐张串部分大号侧的有限元计算结果和理论计算结果对比如图8所示，由图8可知，理论计算的耐张串各连接件的空间位置与有限元计算结果吻合。同时表2给出了大小号侧耐张串倾斜角的计算结果，可以发现结果基本一致，验证了理论计算和有限元分析的准确性。

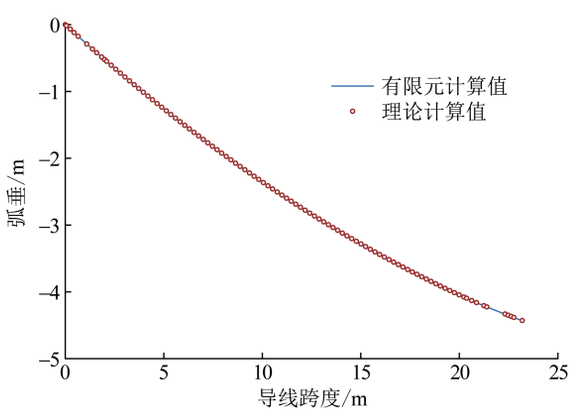


图8 耐张串坐标的有限元与理论计算对比

Fig. 8 Comparison between finite element and theoretical calculation of tension insulator string coordinates

表2 耐张串倾斜角理论计算与有限元计算比较

Table 2 Comparison between theoretical calculation and measured data of the tilt angle of the tension insulator string

导线档	耐张串倾斜角/(°)		
	理论计算值	有限元计算值	偏差值
小号侧	3.912	3.901	−0.011
大号侧	10.814	10.818	+0.004

4 坐标分析计算

4.1 三维坐标系建立

以每极导线耐张串前后挂点连线的中心为坐标原点(左右极分别设置)，y轴坐标平行于线路转角平分线(指向大号侧方向为正)，x轴坐标垂直于线路转角平分线(即横担中心线方向，指向转角内侧方向为正)，z轴坐标为铅垂方向(向上为正)，如图9所示。

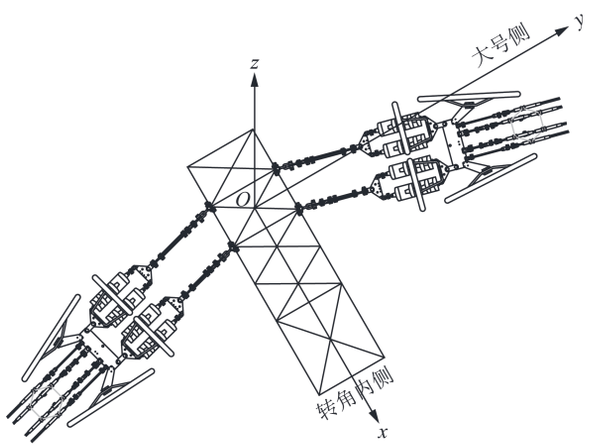
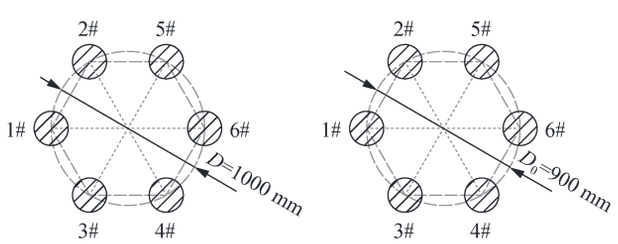


图9 三维坐标系建立示意图

Fig. 9 Schematic diagram of three-dimensional coordinate system establishment

4.2 分裂导线布置编号及间距

六分裂导线布置呈正六边形分三层排列，上层两根分别为2#、5#，中层两根分别为1#、6#，下层两根分别为3#、4#；面向线路前进方向，1#、2#、3#在线束中心左侧，4#、5#、6#在线束中心右侧。耐张串位置的六分裂导线布置圆直径D为1.0 m，笼式刚性跳线上的六分裂导线布置圆直径D_0为0.9 m，如图10所示。



(a) 耐张串位置 (b) 笼式刚性跳线位置

图10 六分裂导线布置编号及间距

Fig. 10 Numbering and spacing of six-bundle wire arrangement

4.3 跳线各悬挂安装点坐标计算分析

为更清晰地分析展示各点计算坐标，结合耐张串及跳线安装布置的俯视图、侧视图，对各基本参数绘图标注，如图11所示。

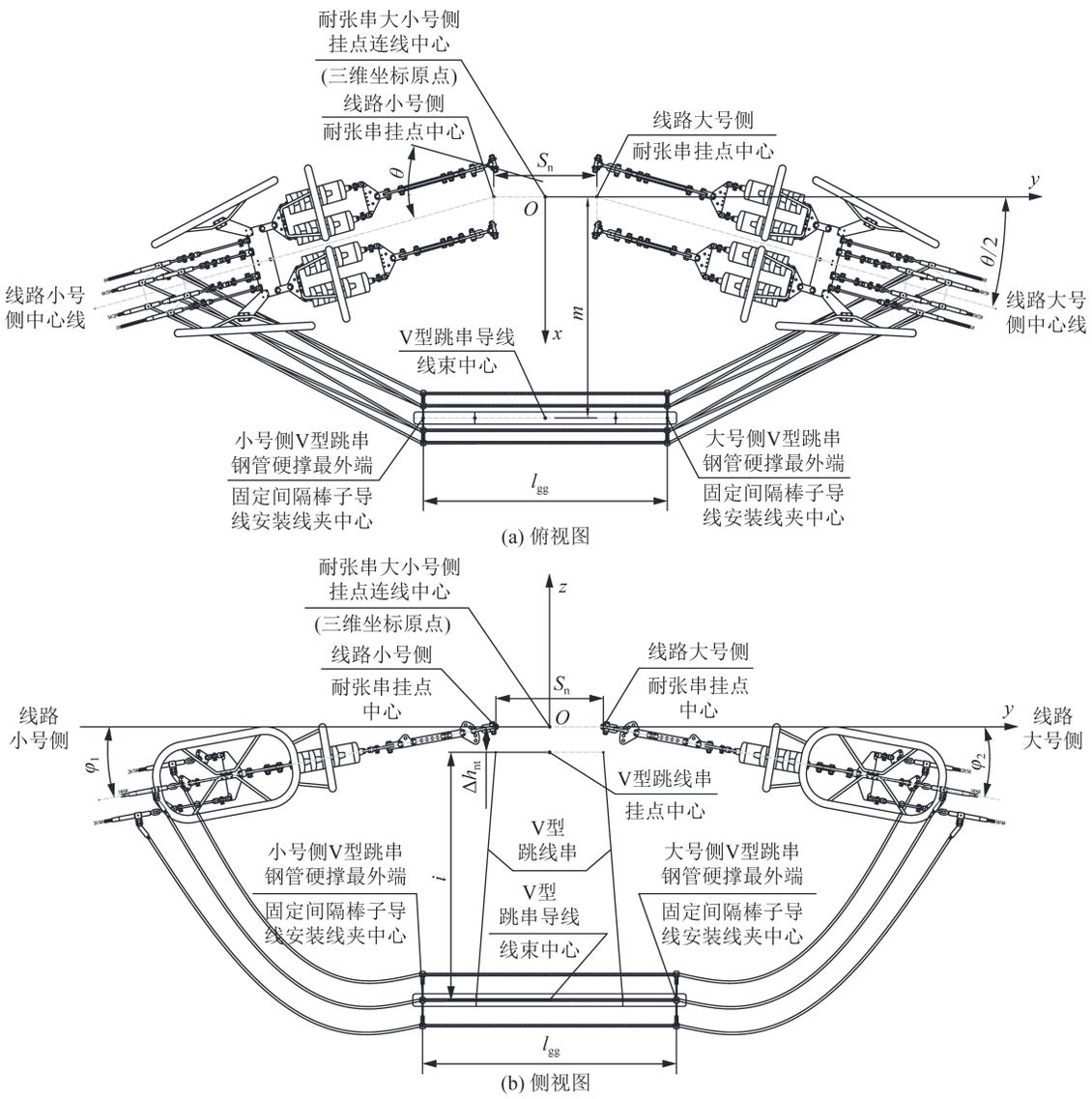


图 11　耐张串及跳线安装布置示意图

Fig. 11　Schematic diagram of tension string and jumper installation

图 11 中：θ 为线路转角；i 为 V 形跳线串垂高（由 V 形跳串挂点至跳串导线线束中心）；S_n 为耐张串大小号侧挂点距离；Δh_{nt} 为耐张串与跳线串挂点高差；m 为跳线串中心较耐张串大小号侧挂点中心在横线路方向上的水平偏距；l_{gg} 为跳线串钢管硬撑长度（按前后最外端两个固定间隔棒的间距计）。

耐张串末端的计算基准点取耐张线夹引流板中心，如图 12 所示。图 12 中，b 为耐张线夹引流板长度（由耐张线夹引流板中心至跳线引流管导线穿管端头）。

结合三维坐标系以及耐张串倾斜角的计算结果，根据线路转角、铁塔横担结构尺寸、耐张串长、V 形跳线串安装位置等基本参数，进行跳线各悬挂安装点（大小号侧耐张线夹引流板中心、V 形跳线串钢管硬撑最外端固定间隔棒子导线安装线夹中心）的坐标分析计算。

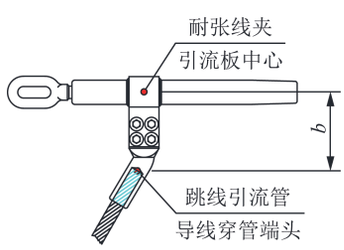


图 12　耐张线夹计算基准点示意图

Fig. 12　Schematic diagram of calculation reference point of tension clamp

4.4　耐张线夹引流板中心坐标计算

1）内角中层子跳线 x、y 和 z 轴坐标。

$$x = \cos\varphi \cdot \sin\frac{\theta}{2} + \frac{D}{2} \cdot \cos\frac{\theta}{2} \tag{10}$$

$$y = \pm\left(\frac{S_n}{2} + \lambda \cdot \cos\varphi \cdot \cos\frac{\theta}{2} - \frac{D}{2} \cdot \sin\frac{\theta}{2}\right) \tag{11}$$

$$z = -\lambda \cdot \sin\varphi \tag{12}$$

2)内角下层子跳线x、y和z轴坐标。

$$x=\lambda\cdot\cos\varphi\cdot\sin\frac{\theta}{2}+\frac{D}{4}\cdot\cos\frac{\theta}{2}-\frac{\sqrt{3}}{4}D\cdot\sin\varphi\cdot\sin\frac{\theta}{2} \tag{13}$$

$$y=\pm\left(\frac{S_n}{2}+\lambda\cdot\cos\varphi\cdot\cos\frac{\theta}{2}-\frac{D}{4}\cdot\sin\frac{\theta}{2}-\frac{\sqrt{3}}{4}D\cdot\sin\varphi\cdot\cos\frac{\theta}{2}\right) \tag{14}$$

$$z=-\left(\lambda\cdot\sin\varphi+\frac{\sqrt{3}}{4}D\cdot\cos\varphi\right) \tag{15}$$

3)内角上层子跳线x、y和z轴坐标。

$$x=\lambda\cdot\cos\varphi\cdot\sin\frac{\theta}{2}+\frac{D}{4}\cdot\cos\frac{\theta}{2}+\frac{\sqrt{3}}{4}D\cdot\sin\varphi\cdot\sin\frac{\theta}{2} \tag{16}$$

$$y=\pm\left(\frac{S_n}{2}+\lambda\cdot\cos\varphi\cdot\cos\frac{\theta}{2}-\frac{D}{4}\cdot\sin\frac{\theta}{2}+\frac{\sqrt{3}}{4}D\cdot\sin\varphi\cdot\cos\frac{\theta}{2}\right) \tag{17}$$

$$z=-\left(\lambda\cdot\sin\varphi-\frac{\sqrt{3}}{4}D\cdot\cos\varphi\right) \tag{18}$$

外角各子跳线的坐标可以同理推出。

4.5 跳串钢管硬撑导线线夹中心坐标计算

1)内角中层子跳线y轴坐标。

$$y=\pm\frac{l_{gg}}{2} \tag{19}$$

2)内角上层子跳线x轴坐标。

$$x=m+\frac{D_0}{2} \tag{20}$$

3)内角上层子跳线z轴坐标。

$$z=-\left(\Delta h_{nt}+i\right) \tag{21}$$

4)内角下层子跳线z轴坐标。

$$z=-\left(\Delta h_{nt}+i+\frac{\sqrt{3}}{4}D_0\right) \tag{22}$$

其他各子跳线的坐标可以同理推出。

5 线长分析计算

要保证大截面六分裂跳线搭设的工艺美观，控制好跳线分裂间距，做到三层跳线排列等高、线间距匀称是关键。由于各分裂跳线的悬挂安装点坐标位置各不相同，引起小档距也不相同，需分别计算各子跳线的弧垂、张力、线长。

以控制跳线最低点左右两两等高，保持间距均匀(即平弧垂相同)为原则进行计算。从跳线弧垂的美观性考虑，参考设计图给出的弧垂推荐值，结合施工经验，一般取档中弧垂为档距的20%～25%，以此为控制条件，先求得1#子跳线的水平张力，再根据悬链线公式求得该子跳线的平弧垂；其他子跳线以平弧垂等于1#子跳线的平弧垂为控制条件进行单变量求解求得水平张力。

1)小号档计算：求得各子跳线张力后，再结合三维坐标数据求得的高差、水平档距，利用悬链线计算公式计算小号档的跳线长度。

2)大号档计算：各子导线张力直接与小号档相等，用相同方法计算大号档的跳线长度。

3)中间档计算：中间档为笼式刚性跳线，基本呈水平状态无高差，考虑支撑间隔棒的高装距离，按最大次档距，取与大小号档相同的水平张力计算最大次档距线长，再根据中间档总档距，按比例进行线长赋值计算。

跳线弧垂、线长均按悬链线法计算[21]，档中弧垂f为：

$$f=\frac{H}{\omega}\left(\cosh\frac{l\omega}{2H}-1\right)\sqrt{1+\left(\frac{h}{\frac{2H}{\omega}\sinh\frac{l\omega}{2H}}\right)^2} \tag{23}$$

平弧垂f_p为：

$$f_p=\frac{H}{\omega}\left[\left(\cosh\frac{l\omega}{2H}\right)\sqrt{1+\left(\frac{h}{\frac{2H}{\omega}\sinh\frac{l\omega}{2H}}\right)^2}-1\right]-\frac{h}{2} \tag{24}$$

跳线线长为：

$$L=\sqrt{\left(\frac{2H}{\omega}\sinh\frac{l\omega}{2H}\right)^2+h^2} \tag{25}$$

分别完成大小号两档软跳及中间档笼式硬跳的长度计算后，进行累加，扣除两侧耐张线夹引流板长度，就得到了跳线安装的净长度。

6 AutoCAD验证

跳线各悬挂安装点坐标计算的准确性是决定装配式跳线安装工艺能否成功的关键，为充分验证坐标计算数据的准确性，结合AutoCAD对三维坐标数据进行验证。

先建立无转角、无倾斜的耐张串及六分裂导线点位，再以耐张串挂点为中心，通过水平旋转(一半线路转角)、垂直旋转(倾斜角)，模拟实际耐张串位置，结合耐张塔的横担结构模拟画出耐张串挂点位置、跳串的布置位置。

将计算得到的各跳线悬挂安装点三维坐标导入AutoCAD，经验证，各点位均与AutoCAD绘图模拟的

跳线悬挂安装点一致，如图 13 所示。

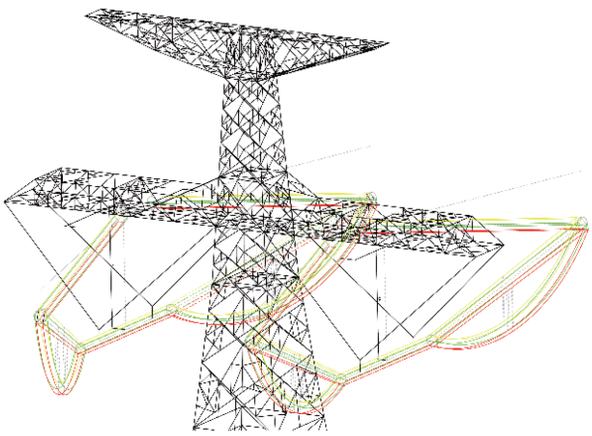


图 13　计算坐标与 AutoCAD 绘图模拟对比示意图

Fig. 13　Diagram of comparison between calculation coordinates and AutoCAD drawing simulation

7　通用计算程序编写

结合计算理论分析，依托 Python 编程语言，采用面向对象编程思想编写了六分裂跳线长度计算通用程序，结合 Tkinter 搭建图形交互界面，支持 Windows 系统的桌面端计算应用，可直接用于现场进行通用计算，具有较强的实用性与便捷性。软件计算逻辑如图 14 所示，通用计算程序界面如图 15 所示。

8　现场应用验证

结合甘浙特高压直流工程，在 N5436 耐张塔开展

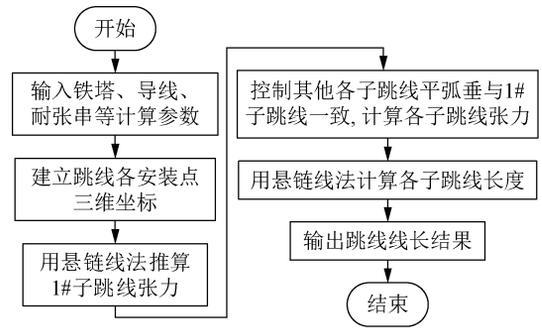


图 14　六分裂跳线长度计算逻辑图

Fig. 14　Logic diagram for calculating of six-bundle jumper length

了六分裂跳线的装配式安装应用验证。收集基本参数后（见表 3），通过计算获取跳线装配式安装长度，如表 4 所示。采用地面测量跳线长度、地面压接引流线夹、地面预安装笼式刚性跳线、整体吊装后高空直接安装就位的装配式安装方式，并采用全站仪免棱镜地面测量与搭载实时动态（real-time kinematic，RTK）定位的无人机空中测量进行复核。

耐张串倾斜角现场实测换算值与理论计算值及偏差值如表 5 所示，结果验证了本文采用计算方法的准确性。

左右极、大小号档的平弧垂实测值与理论值偏差小于 5 cm，各档子跳线间的间隔均匀，跳线顺直，整体工艺美观性良好，如图 16 所示。

与传统的高空模拟法安装相比，采用装配式安

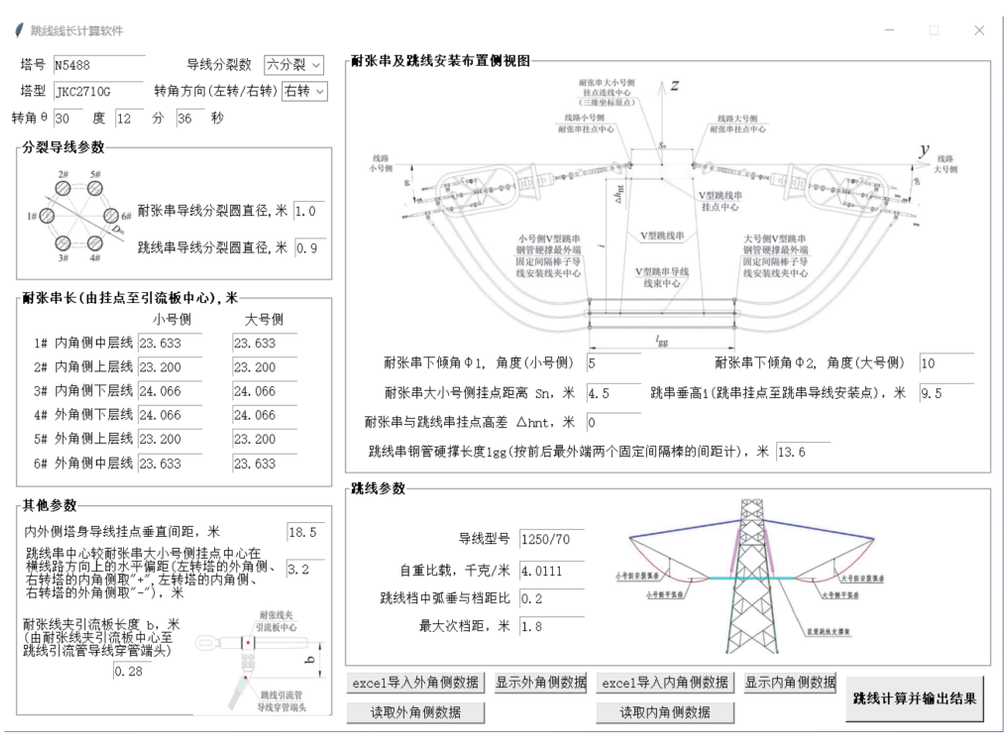


图 15　六分裂跳线长度计算通用程序界面

Fig. 15　General interface of calculation for six-bundle jumper length

表 3 跳线长度计算输入参数

Table 3 Input parameters for jumper length calculation

子跳线号	子跳线位置	D/m	D_0/m	λ/m		i/m	φ/(°)		S_n/m	Δh_n/m	m/m	l_{gg}/m	b/m
				小号侧	大号侧		小号侧	大号侧					
6#	内角侧中层线	1.0	0.9	23.633	23.633	9.453	3.912	10.814	4.606	0	−1.113	13.6	0.28
4#	内角侧下导线			24.066	24.066								
5#	内角侧上层线			23.200	23.200								
2#	外角侧上层线			23.200	23.200								
3#	外角侧下层线			24.066	24.066								
1#	外角侧中层线			23.633	23.633								

表 4 跳线长度计算输出数据

Table 4 Output data for jumper length calculation

子跳线号	子线位置	f/m		f_μ/m		L/m		$L_{中间档}$/m	$L_{总}$/m
		小号档	大号档	小号档	大号档	小号档	大号档		
6#	内角侧中层线	4.33	4.03	1.20	1.86	22.82	21.56	13.61	58.00
4#	内角侧下导线	4.30	3.98	1.20	1.86	23.18	21.86	13.61	58.65
5#	内角侧上层线	4.37	4.08	1.20	1.86	22.58	21.38	13.61	57.57
2#	外角侧上层线	4.36	4.08	1.20	1.86	22.68	21.49	13.61	57.79
3#	外角侧下层线	4.30	3.98	1.20	1.87	23.29	21.97	13.61	58.87
1#	外角侧中层线	4.33	4.03	1.20	1.86	23.04	21.78	13.61	58.43

表 5 耐张串倾斜角理论计算与实测数据比较

Table 5 Comparison between theoretical calculation and measured data of the tilt angle of the tension insulator string

导线档	耐张串倾斜角/(°)		
	理论计算值	实际测量换算值	偏差值
小号侧	3.912	3.877	−0.035
大号侧	10.814	10.834	+0.020



(a) 侧视图



(b) 正视图

图 16 甘浙特高压直流六分裂跳线装配式安装照片

Fig. 16 Pre-assembly installation photo of six-bundle jumper for Gan—Zhe UHVDC

装后，高空作业量减少了 46.4%，施工效率提高了 25%，人工投入节约了 33.3%，人工投入与工期对比如表 6 所示。

表 6 高空模拟法与装配式安装人工与工期对比

Table 6 Comparison of labor input and installation period between high-altitude simulation installation and prefabricated installation

安装方法	作业人数/人		安装工期/d	人工日/(人·d)
	高处作业	地面作业		
高空模拟法	7	11	4	72
装配式安装	5	11	3	48

9 结 论

本文围绕特高压直流六分裂大截面导线耐张串倾斜角计算、跳线长度计算及装配式安装问题展开研究，通过理论分析、程序开发与工程实践验证，系统完成相关研究工作，得到以下结论：

1）耐张串倾斜角迭代计算方法可解决传统计算方法的精度缺陷。传统方法将耐张串等效为均布自重荷载，忽略了耐张串各部件受力差异及几何姿态的动态变化，导致计算结果与工程实际存在偏差；本文提出的迭代计算方法，充分考虑耐张串的结构特性、受力机理，通过多轮迭代修正计算参数，提升了

耐张串倾斜角计算的准确性，弥补了传统计算方法的不足。

2）六分裂跳线长度计算通用程序，可实现跳线长度的高效、精准设计。程序融入图形交互设计，可根据不同工程场景、导线参数及布置方式，快速完成跳线长度的计算，界面简洁、操作便捷，无须复杂的专业编程基础即可上手使用。经工程实例验证，程序计算结果误差控制在合理范围，具备较强的实用性和通用性，提高了工作效率和安装质量。

3）实现了特高压直流六分裂大截面导线跳线的装配式安装，构建了高效、安全、优质的施工安装计算方法。针对传统高空模拟法作业存在的高空作业量大、安装效率低、导线损耗高及工艺美观性不足等问题，本文提出并实现了跳线装配式安装模式，将大部分高空作业转化为地面预制装配，有效减少了高空作业时长和作业强度，显著提升了施工效率，为特高压直流输电工程跳线施工提供了可推广、可复制的技术方案。

4）装配式跳线计算涉及参数较多，需查阅相关设计图纸并进行认真核对，必要时进行现场实测，以保证基本参数录入的准确性。耐张串的倾斜角与导线水平张力密切相关，因档距不同、季节不同导线水平张力会有较大变化，经计算分析，常规 400 m 左右的档距，在高温、低温环境下，导线张力差可超 5800 N，计算倾斜角后串末端的高差变化可超 0.3 m，对跳线长度有较大影响，为此计算时应结合施工季节合理选取导线水平张力。

本文的研究成果在耐张串计算精度、跳线设计效率及施工工艺优化方面实现了提升与创新，有效解决了特高压直流六分裂大截面导线工程中的关键技术难题，为同类输电工程的设计、施工提供了理论参考与实践借鉴。后续将进一步开展多塔型、不同转角等工况条件下的实测验证；结合 BIM 与数字化技术，开展跳线参数录入的自动匹配研究，完善计算流程；同时开展不同电压等级、导线分裂数等场景的适用性研究，提升工程通用性。

利益冲突声明（Conflict of Interests）：

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明（Authors' Contributions）：

段福平提出研究方向，参与论文写作和修订；柳达设计研究思路，实施研究过程；吕铎进行文献调研与整理，参与实验实施、结果分析与论文修改；肖峰参与实验实施、结果分析与论文修改；吴昊亭确定研究对象范围，收集数据，参与论文修订、最终版本审核；王京京收集、整理、分析数据。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

10　参考文献

[1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京：中国电力出版社，2013.
Liu Zhenya. Ultra-high voltage AC & DC grid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.

[2] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京：中国经济出版社，2005.
Liu Zhenya. Ultra-high voltage grid[M]. Beijing: Economic Press China, 2005.

[3] 中华人民共和国国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[EB/OL]. (2016-03-17)[2026-02-02]. https://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content_5054992.htm.

[4] 中华人民共和国国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13) [2026-02-02]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.

[5] 国家发展改革委，国家能源局，国家数据局. 加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027年)[EB/OL]. (2024-07-25)[2026-02-02]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6966863.htm.

[6] 周浩. 特高压交直流输电[M]. 杭州：浙江大学出版社，2017.
Zhou Hao. Ultra-High voltage AC/DC power transmission [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2017.

[7] 国家电网有限公司. 国家电网累计建成42项特高压工程 跨区跨省输电能力达3.7亿千瓦[N/OL]. 新华网，2026-01-16[2026-02-26] . https://www.xinhuanet.com/fortune/20260116/e609d7cfc09f4d7c851abc8950dcd751/c.html.

[8] 万建成，余军，寻凯，等. 900 mm²大截面导线在特高压直流工程中的应用[J]. 电网技术，2009，33(15)：60-65.
Wan Jiancheng, Yu Jun, Xun Kai, et al. Application of 900 mm² large cross-section conductor in UHV DC project [J]. Power System Technology, 2009, 33(15): 60-65.

[9] 周唯，吴子怡. 特高压直流输电线路1250 mm²截面导线选型研究[J]. 四川电力技术，2014，37(6)：24-28，48.
Zhou Wei, Wu Ziyi. Study on 1250 mm² conductor selection of UHV DC transmission line [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2014, 37(6): 24-28, 48.

[10] 中国电力工程顾问集团有限公司，中国能源建设集团规划设计有限公司. 电力工程设计手册：技术经济[M]. 北京：中国电力出版社，2019.

[11] 郝阳，王恩久，陈建忠，等. 750 kV输电线路四分裂刚性跳线系统[J]. 电力建设，2013，34(12)：102-105.
Hao Yang, Wang Enjiu, Chen Jianzhong, et al. Rigid jumper of quadri-split conductors in 750 kV transmission line [J]. Electric Power Construction, 2013, 34(12): 102-105.

[12] 赵远涛，李京凯，刘文勋，等. ±800 kV特高压直流耐张塔跳线的优化方案[J]. 电力建设，2012，33(2)：27-31.
Zhao Yuantao, Li Jingkai, Liu Wenxun, et al. Optimization of jumper design for tension towers of ±800 kV UHV DC transmission line[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(2): 27-31.

[13] 崔秋菊，张周，童庆望. 六分裂笼形硬跳线安装工艺[J]. 湖北电力，2010，34(6)：62-63.
Cui Qiuju, Zhang Zhou, Tong Qingwang. Installation technique for cage-shape hard jumper of six-conductor bundle [J]. Hubei Electric Power, 2010, 34(6): 62-63.

[14] 陈兵. 特高压直流六分裂笼形硬跳线安装工艺[J]. 电子世界, 2012(8): 49.
[15] 尹泉军, 崔志国, 付明翔, 等. 1000 kV特高压交流输电线路跳线安装施工技术[J]. 河北电力技术, 2010, 29(6): 41-43.
Yin Quanjun, Cui Zhiguo, Fu Mingxiang, et al. 1 000 kV UHV AC transmission line jumper installation and construction technics [J]. Hebei Electric Power, 2010, 29(6): 41-43.
[16] 赵瑞旺. 特高压直流六分裂鼠笼硬跳线装配式施工工艺应用[J]. 广东科技, 2014, 23(18): 88-88, 90.
[17] 田广俊. 浅谈特高压交流输电线路跳线安装施工技术[J]. 企业技术开发, 2014, 33(30): 92-93.
Tian Guangjun. Discussion on jumper installation construction technology of UHV AC transmission line [J]. Technological Development of Enterprise, 2014, 33(30): 92-93.
[18] 刘兴亚, 周洋. 特高压交流输电线路跳线安装施工技术[J]. 集成电路应用, 2021, 38(12): 94-95.
Liu Xingya, Zhou Yang. Installation and construction technology of jumper for UHV AC transmission line [J]. Application of IC, 2021, 38(12): 94-95.
[19] 黄成云. 500 kV输电线路耐张塔4-4跳线长度计算[J]. 电力建设, 1997, 18(4): 26-32, 59.
Huang Chengyun. Calculation of jumper length of tension tower 4-4 of 500 kV transmission line [J]. Electric Power Construction, 1997, 18(4): 26-32, 59.
[20] 杨宝海, 王育, 陆国智, 等. 基于三维坐标系的"四分裂"跳线长度计算方法[J]. 山东工业技术, 2016(18): 231- 232.
[21] 李博之. 高压架空输电线路施工技术手册-架线工程计算部分[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2008.
Li Bozhi. Technical manual for construction of high-voltage overhead transmission lines-calculation section of overhead transmission lines [M]. 3rd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
[22] 邵天晓. 架空送电线路的电线力学计算[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2003.
Shao Tianxiao. Mechanical calculation of overhead transmission lines[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
[23] 张锴, 徐劲松. ±500 kV直流耐张塔跳线长度计算的一种新方法[J]. 中国新技术新产品, 2022(18): 72-74.
Zhang Kai, Xu Jinsong. A new method for calculating the jumper length of ±500 kV DC tension tower[J]. New Technology & New Products of China, 2022(18): 72-74.
[24] 周贺, 黄健, 牛林华. ±800 kV线路中导线耐张串荷载对弧垂、张力的影响[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 49-53, 61.
Zhou He, Huang Jian, Niu Linhua. Influence of wire tension insulator string's load to conductor sag and tension in ±800 kV transmission line[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 49-53, 61.
[25] 宋刚, 沈国辉, 包玉南, 等. 耐张串对UHV导线弧垂影响的现场实测和理论分析[J]. 中国电力, 2021, 54(1): 142-149.
Song Gang, Shen Guohui, Bao Yu'nan, et al. Full-scale testing and theoretical analysis of influence of tension insulator strings on the sag of UHV conductors [J]. Electric Power, 2021, 54(1): 142-149.
[26] 罗咏, 黄震, 王新桥. 直流特高压线路耐张串对导线弧垂影响的分析[J]. 数字通信世界, 2018(12): 95, 181.
Luo Yong, Huang Zhen, Wang Xinqiao. Analysis of the influence of tension string on conductor sag of DC UHV transmission line[J]. Digital Communication World, 2018(12): 95, 181.
[27] 赵全江, 刘文勋, 黄欲成. 基于耐张串等效悬链线形状下的特高压孤立档计算方法研究[J]. 智能电网, 2015, 3(2): 145-150.
Zhao Quanjiang, Liu Wenxun, Huang Yucheng. Research of UHV transmission line isolated span calculation based on tension string being equivalent to catenary [J]. Smart Grid, 2015, 3(2): 145-150.
[28] 卢本初, 陆小艺. 耐张串对导线弧垂的影响分析[J]. 红水河, 2017, 36(6): 58-60, 67.
Lu Benchu, Lu Xiaoyi. Influence and analysis of tension string on conductor sag[J]. Hongshui River, 2017, 36(6): 58-60, 67.
[29] 尹迪迪. 特高压直流输电线路耐张绝缘子串对导线应力和弧垂特性的影响分析[J]. 红水河, 2018, 37(1): 53-55, 63.
Yin Didi. Analysis on the influence of strain insulator string of UHV DC transmission line on stress and sag characteristics of conductor[J]. Hongshui River, 2018, 37(1): 53-55, 63.
[30] 杨博, 李陶波, 王爱华, 等. 特高压耐张串悬链线形状计算的研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2014, 35(3): 66-70.
Yang Bo, Li Taobo, Wang Aihua, et al. Research on calculation method of UHV tension string catenaries' shape [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2014, 35(3): 66-70.

收稿日期: 2026-03-19 **修回日期**: 2026-05-13


段福平

作者简介:

段福平(1978),男,本科,正高级工程师,通信作者,主要研究方向为输电线路施工技术,Email: wwwdfp@163.com;

柳达(1984),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为输电线路施工管理;

吕铎(1978),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向为特高压输变电工程建设管理;

肖峰(1980),男,博士,正高级工程师,主要研究方向为特高压输变电工程建设管理;

吴昊亭(1977),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向为特高压输变电工程建设管理;

王京京(1994),男,硕士,工程师,主要研究方向为输电线路施工技术。

(编辑 张小飞)